

Matěj PETRUŽÁLEK¹, Tomáš LOKAJÍČEK², Vladimír RUDAJEV³, Jan VILHELM⁴

VLIV VZÁJEMNÉ ORIENTACE STRUKTURY MIGMATITU A SMĚRU JEDNOOSEHO NAMÁHÁNÍ NA PARAMETRY ULTRAZVUKOVÉHO PROZAŘOVÁNÍ

RELATION BETWEEN MIGMATITE STRUCTURE AND ULTRASONIC PARAMETERS UNDER VARIOUS LOADING CONDITIONS

Abstract

This contribution is focused on changes of seismic waves velocities by means of ultrasonic sounding. Cylindrical samples (migmatite) loading was carried out under constant strain and stress rate. Special attention was devoted to the orientation between migmatite foliation and applied uniaxial load. Experiments were realized by using net of eight ultrasonic sensors. Measured data were processed by derived method of velocity ellipsoid approximation. Changes of velocities, orientation of ellipsoid axes and coefficient of anisotropy were analyzed and interpreted according to rock samples stress state.

Key words: seismic wave velocity, ultrasonic sounding, uniaxial load

Úvod

Horniny poměrně často vykazují makroskopickou anizotropii mechanických vlastností. Tato anizotropie je důsledkem:

- ☐ anizotropie krystalické stavby jednotlivých minerálů,
- ☐ uspořádané orientace minerálních zrn
- ☐ orientace systémů trhlin a mikroporušení.

Anizotropie mechanických vlastností může být vyvolána i orientovaným působením síly. Anizotropii rovněž ovlivňuje všesměrné zatížení. Typickými představiteli anizotropních hornin jsou přeměněné a sedimentární horniny. Anizotropie se však může vyskytovat i u hornin vyvřelých.

Anizotropie mechanických vlastností ovlivňuje chování horniny při působení síly i způsob porušení horniny. Stejně tak je i příčinou anizotropie rychlosti šíření elastických vln v horninách.

Anizotropie rychlosti elastických vln na jednu stranu komplikuje modely šíření seismických vln horninovým prostředím, na druhou stranu může být zjišťována, a tak poskytuje cenné informace o struktuře hornin v hloubkách, kde nejsou horniny dostupné přímému pozorování. Aby bylo možné vztah mezi anizotropií rychlosti a strukturou využít k interpretaci geofyzikálních měření, je potřeba detailně poznat zda a jak je tento vztah ovlivňován napětově deformačním stavem horniny.

Presentovaný výzkum byl orientován na stanovení vlivu vzájemné orientace struktury horniny a směru jednoosého namáhání na vybrané parametry ultrazvukového prozařování. Jako testovací horninový materiál s výraznou strukturou byl zvolen migmatit z lokality Skalka. Struktura se projevuje makroskopicky pozorovatelnou foliací. Anizotropie šíření ultrazvukových vln byla experimentálně zkoumána v závislosti na vzájemné orientaci působící síly (resp. deformace) vzhledem k foliaci. Testovaný materiál byl podroben pro srovnání i ultrazvukovému prozařování

¹ Přírodovědecká fakulta University Karlovy v Praze, Geologický ústav AV ČR, v.v.i., Praha

² Ing., CSc., Geologický ústav AV ČR, v.v.i., Praha, tl@gli.cas.cz

³ RNDr., DrSc., Geologický ústav AV ČR, v.v.i., Praha, rudajev@gli.cas.cz

⁴ Doc. RNDr., CSc., Přírodovědecká fakulta University Karlovy v Praze, Geologický ústav AV ČR, v.v.i., Praha, vilhelm@natur.cuni.cz

v podmínkách všesměrné napjatosti, aby bylo možné posoudit vývoj změn anizotropie s rostoucím všesměrným namáháním.

Byla vypracována metodika hodnocení anizotropie rychlosti šíření elastických vln v průběhu laboratorního jednoosého zatěžování horninových vzorků založená na výpočtu aproximačního elipsoidu anizotropie rychlosti. Tento interpretační postup je umožněn vyhodnocováním časů příchodu UV na síť ultrazvukových snímačů. Takto stanovená anizotropie je přesnější, než běžně stanovená anizotropie z hodnot rychlosti šíření UV pouze ve třech na sebe kolmých směrech. Dále byl sledován vzájemný vztah anizotropie rychlosti a orientace plochy konečného porušení vzorku při různé orientaci působícího jednoosého namáhání vůči foliaci.

Získané výsledky mohou přispět k řešení problematiky stability podzemních inženýrských objektů, jakými jsou například úložiště radioaktivního odpadu nebo důlní díla.

Vztah struktury horniny k anizotropii rychlosti

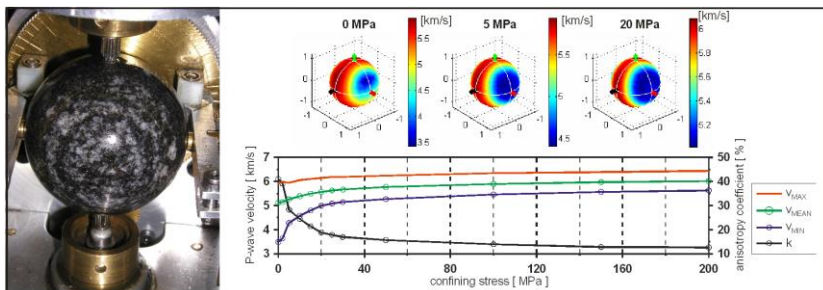
Zjišťování anizotropie rychlosti elastických vln v horninách souvisí s určováním jejich elastických parametrů. Elastické parametry hornin jsou zjišťovány pomocí statických nebo dynamických metod. Statické metody určují elastické vlastnosti z Hookova zákona, tj. hledají lineární vztah mezi působící silou a velikostí deformace, kterou tato síla vyvolala. V případě existence volných trhlin může být tato metodika ovlivněna jejich zavíráním vlivem působící síly a nalezení lineárního vztahu mezi silou a deformací nemusí být realizovatelné. Dynamické metody využívají ke zjišťování elastických konstant prozařování prostředí mechanickým vlněním, nebo se opírají o analýzu vlastního nebo nucených kmitů vzorku. Metody založené na prozařování se opírají o stanovení doby průchodu vlnění vzorkem podél známé dráhy. Dynamické metody na rozdíl od statických metod vycházejí z aplikace malých deformací a krátkodobého působení síly.

Studiem anizotropie rychlosti elastických vln v minerálech a horninách a zejména jejím využitím ke studiu hluboké stavby litosféry se systematicky u nás zabýval například Babuška (1984). Příkryl a kol. (2006) ukázal, že ve vyvřelých horninách může všesměrný tlak vyvolat uzavření trhlin, a tak může docházet s růstem všesměrného tlaku ke změnám v anizotropii rychlosti. Pokud je samotná struktura vyvřelé horniny všesměrná a blíží se izotropnímu tělesu, může při dostatečně vysokém všesměrném tlaku vymizet i anizotropie rychlosti. Babuška (1984) předpokládá, že anizotropie způsobená vlivem trhlin vymizí v hloubce 5 – 6 km, tj. asi za všesměrného tlaku 200 MPa. V prostředí neporušeném trhlínami je dána anizotropie pouze strukturou horniny. Příkryl a kol. (2006) ukázal, že anizotropie těchto hornin se při změně velikosti všesměrného tlaku nemění. Pokud hornina vykazuje anizotropii jak v důsledku struktury minerálních zrn, tak v důsledku přednostní orientace trhlin, změny anizotropie závisí na vzájemné orientaci obou těchto strukturních elementů. Pokud směry nesouhlasí, dochází se změnou všesměrného tlaku nejen ke změně velikosti anizotropie, ale mění se i její orientace.

Experiment

Testovaný materiál

Pro zkoumání vlivu vzájemné orientace působícího napětí a struktury hornin na vývoj porušení byl jako vhodný materiál vybrán migmatit z lokality Skalka. Testovaný migmatit má výraznou makroskopickou strukturu, jak je vidět na obr. 1. Pro ověření vlivu struktury migmatitu na anizotropii rychlosti P-vln bylo provedeno nejprve ultrazvukové měření na kulových vzorcích. Při tomto měření je zkoušený horninový vzorek prozařován ve 132 nezávislých směrech při několika úrovních všesměrného napětí (Pros & Podroužková 1974, Pros 1977, Pros et al. 1998). Výsledky tohoto měření jsou zachyceny na obr. 1. Z něj vyplývá, že minimální rychlost je orientována kolmo na foliaci migmatitu a maximální rychlost leží v rovině foliace.



Obr.1 Ukázka výsledků ultrazvukového prozařování kulového vzorku migmatitu. Vlevo: ukázka struktury studovaného horninového materiálu. Vpravo nahoře: zobrazení rozložení rychlosti ultrazvukových vln na povrchu kulového vzorku v podmínkách úrovně všesměrného zatížení 0,5 a 20 MPa. Vpravo dole: průběh maximálních, minimálních a průměrných rychlostí v závislosti na všesměrném zatížení od 0 do 200 MPa.

Kvantitativně lze velikost anizotropie popsat pomocí koeficientu anizotropie k , v našem případě definovaného podle vztahu

$$k = 100\% \frac{v_{MAX} - v_{MIN}}{v_{MAX}}, \quad (1)$$

kde v_{MAX} je maximální naměřená rychlost a v_{MIN} je minimální naměřená rychlost. Tento vztah je modifikace původní definice koeficientu anizotropie podle Birche (1961), který koeficient anizotropie zavedl vztahem

$$c = 100\% \frac{v_{MAX} - v_{MIN}}{v_{MEAN}} \quad (2)$$

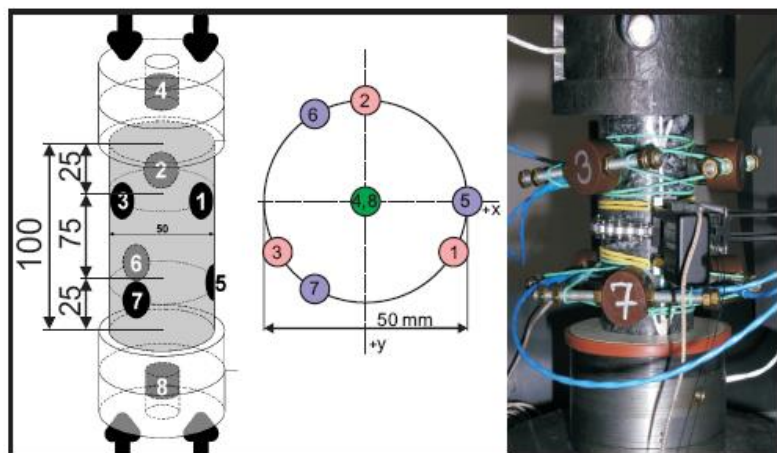
kde v_{MEAN} představuje průměrnou hodnotu rychlosti. Její určení v případě uvedeného prozařování kulového vzorku vyžaduje počítat průměrnou rychlost ze 132 směrů jako vážený průměr rychlostí, kde váha jednotlivých měření souvisí velikostí povrchu, který dané měření reprezentuje.

Stanovení anizotropie rychlosti na kulovém vzorku v podmínkách všesměrného zatížení ukázalo, že až do zatížení 200 MPa nedochází ke změně orientace maximální a minimální rychlosti, ale dochází ke snížení anizotropie z 41.1% na 12.6%. Po odlehčení dojde k návratu na původní hodnoty rychlostí a koeficientu anizotropie. Zachování orientace maximální a minimální rychlosti během celého průběhu zatěžování svědčí o existenci systému trhlin, který je orientovaný paralelně s foliací a v průběhu zatěžování dochází k vratnému procesu uzavírání trhlin.

Zatěžovací experimenty

Pro jednotlivé experimenty byly použity válcové vzorky o průměru 50 mm a výšce 100 mm. Orientace foliace migmatitu u válcových vzorků vzhledem k působícímu namáhání byla volena paralelní, kolmá a šikmá. Pro zatěžování byl použit zatěžovací systém firmy MTS. Zatěžování bylo realizováno jako jednoosé, a to buď v režimu řízené deformace s konstantním přírůstkem deformace za časovou jednotku, nebo v režimu řízené síly s konstantním přírůstkem síly za časovou jednotku. Každá ze tří zvolených orientací vzorku byla proměřena v obou režimech.

Každý proměřovaný vzorek byl osazen osmi širokopásmovými snímači ultrazvukové emise WD firmy PAC, U.S.A. Schéma rozložení snímačů je zachyceno na obr. 2.



Obr.2 Uspořádání snímačů při jednoosém zatěžování válcových vzorků.

Tyto snímače byly používány jak pro zachycení jevů akustické emise, tak pro ultrazvukové prozařování v průběhu zatěžování vzorku. Pro registraci akustické emise a současně i signálů ultrazvukového prozařování a bylo využito osmikanálové aparatury Vallen Systeme. Aparatura byla zapojena ve spouštěcím režimu, vzorkovací frekvence byla 10 MHz, a délka záznamu 2 048 bodů.

Analýza anizotropie rychlosti ultrazvukových vln v průběhu zatěžovacích experimentů

Rychlost ultrazvukových vln v zatěžovaných horninových vzorcích je určována pomocí ultrazvukového prozařování. Opakovaně je vždy na jeden ze snímačů přiveden napěťový impuls, který je zdrojem elastické vlny. Ze záznamu vlnění, které prošlo vzorkem k ostatním snímačům pak lze stanovit čas průchodu mezi odpovídajícími dvěma snímači a tak i stanovit rychlost odpovídající této dráze.

Výsledky ultrazvukového prozařování jsou transformovány do rychlostního elipsoidu. Tento elipsoid je konstruován jako plocha, která přibližně prochází koncovými body vektorů rychlosti. Tyto vektory rychlosti mají počátek ve středu elipsoidu, jejich směr je skutečným směrem spojnice zdroje a přijímače ultrazvukového vlnění na povrchu válcového vzorku (viz obr. 2.) a jejich velikost je určena stanovenou rychlostí.

Pro síť složenou z osmi snímačů, z nichž lze každý využít jako vysílač ultrazvukového vlnění, lze změřit celkem 56 různých časů prozařování. Polovina z těchto měření je ale jen opakováním prozařování v přímém a opačném směru podél téže dráhy. Při výpočtu vektoru rychlosti proto používáme průměrnou hodnotu času z obou těchto měření a tu přiřazujeme danému směru dráhy. Dále některé dvojice snímačů definují dráhu, pro kterou se může vlnění částečně šířit ocelovou tlačnou plochou lisu. Takové směry měření je vhodné předem vyloučit ze zpracování. Po této úpravě dostaneme 22 nezávislých měření. Takto určené rychlosti v příslušných směrech použijeme k optimalizačnímu stanovení elipsoidu rychlosti.

Elipsoid anizotropie rychlosti je tak kvadratickou plochou a uvažujeme-li, že jeho střed leží v počátku souřadného systému umístěného do středu vzorku, musí každý bod $[x_i \ y_i \ z_i]$ na elipsoidu splňovat rovnici:

$$\begin{bmatrix} x_i & y_i & z_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = 1, \quad (3)$$

kde a_{ij} jsou koeficienty symetrické matice \mathbf{A} , která určuje parametry elipsoidu.

Rovnice (2) může být upravena roznásobením na tvar:

$$x_i^2 a_{11} + y_i^2 a_{22} + z_i^2 a_{33} + 2x_i y_i a_{12} + 2x_i z_i a_{13} + 2y_i z_i a_{23} = 1, \quad (4)$$

kde $i = 1, 2, \dots, 22$.

Šest neznámých parametrů a_{ij} rychlostního elipsoidu může být nalezeno pomocí Gaussovy metody obecné inverze (Meju, 1994), založené na minimalizaci součtu čtverců odchylek vektorů rychlosti od průběhu plochy elipsoidu rychlosti.

Rovnice (4) může být zapsána jako

$$\mathbf{Gm} = \mathbf{d},$$

$$\text{kde } \mathbf{G} = \begin{bmatrix} x_1^2 & y_1^2 & z_1^2 & 2x_1 y_1 & 2x_1 z_1 & 2y_1 z_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{22}^2 & y_{22}^2 & z_{22}^2 & 2x_{22} y_{22} & 2x_{22} z_{22} & 2y_{22} z_{22} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{m} = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{22} \\ a_{33} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{23} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{d} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Hledaný vektor \mathbf{m} , tvořený šesti nezávislými prvky matice \mathbf{A} může být vyjádřen pomocí obecné inverze:

$$\mathbf{m} = (\mathbf{G}\mathbf{G}')^{-1} \mathbf{G}' \mathbf{d},$$

kde čárka označuje transponovanou matici.

Výhodou zvoleného postupu je následná možnost určit velikosti a směry os elipsoidu rychlosti pomocí výpočtu vlastních čísel a vlastních vektorů matice \mathbf{A} . Velikosti a směry os elipsoidu rychlosti odpovídají rychlostem v_{MAX} , v_{MEAN} a v_{MIN} a jejich směrům. Optimalizační přístup k řešení vede ke shlazení odchylek daných například vnitřní nehomogenitou horninového materiálu. Nevýhodou tohoto přístupu je, že vychází z modelu, v němž existuje jediný směr maximální rychlosti a jediný směr minimální rychlosti. Směry odpovídající rychlostem v_{MAX} , v_{MEAN} a v_{MIN} jsou navíc navzájem kolmé.

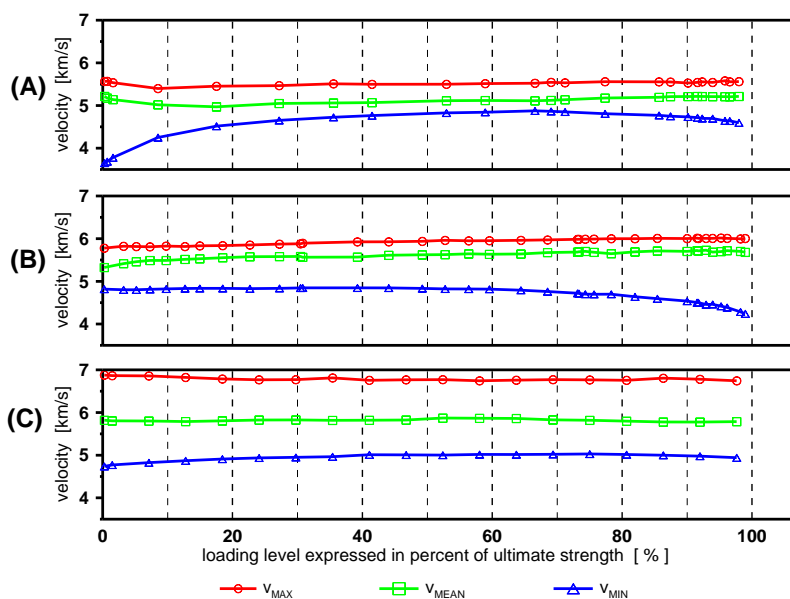
K hodnocení kvality aproximace proložení plochou elipsoidu byla používána střední hodnota sumy čtverců odchylek Δv_i naměřených velikostí rychlosti od hodnoty rychlosti vyplývající z aproximace elipsoidem v daném směru:

$$RMS = \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{\Delta v_i^2}}{n}. \quad (5)$$

Výsledky a jejich diskuze

Na základě provedených experimentů byl zkoumán vliv režimu zatěžování (řízená deformace, řízená síla) a vliv vzájemné orientace mezi působícím jednoosým zatížením a foliací testovaného migmatitu na anizotropii rychlosti šíření ultrazvukových vln. Získané výsledky byly vyhodnoceny i v souvislosti s porušováním horninových vzorků. Kromě ultrazvukového prozařování byla sledována i akustická emise, a to ve vztahu k úrovni zatížení, vyjádřené v procentech pevnosti proměřovaného vzorku. Pro interpretaci ultrazvukového prozařování je používán rychlostní elipsoid, a to velikosti jeho poloos (v_{MAX} , v_{MEAN} , v_{MIN}), jejich směry (α_{MAX} , α_{MEAN} , α_{MIN}) a koeficient anizotropie k (vztah (1)). Byla vyvinuta metodika, která při jednoosém zatěžování umožňuje analogické vyhodnocování anizotropie, jaké se doposud používalo při měření na kulových vzorcích. To umožnilo srovnání výsledků měřených při jednoosém namáhání na válcových vzorcích s výsledky hydrostaticky stlačovaných kulových vzorků. Dosažené výsledky při obou experimentech vykazují dobrou shodu.

Ukázka změn maximální, minimální i střední rychlosti šíření ultrazvukových vln v průběhu zatěžování jsou znázorněny na obr. 3. Na tomto obrázku jsou uvedeny různé konfigurace orientace působící síly vzhledem k foliaci hornin.



Obr.3 v_{MAX} , v_{MEAN} a v_{MIN} : rychlosti ve směrech os rychlostního elipsoidu vzhledem k úrovni zatížení. Zatěžování řízeno silou s konstantním přírůstkem 0.5 kN/min.

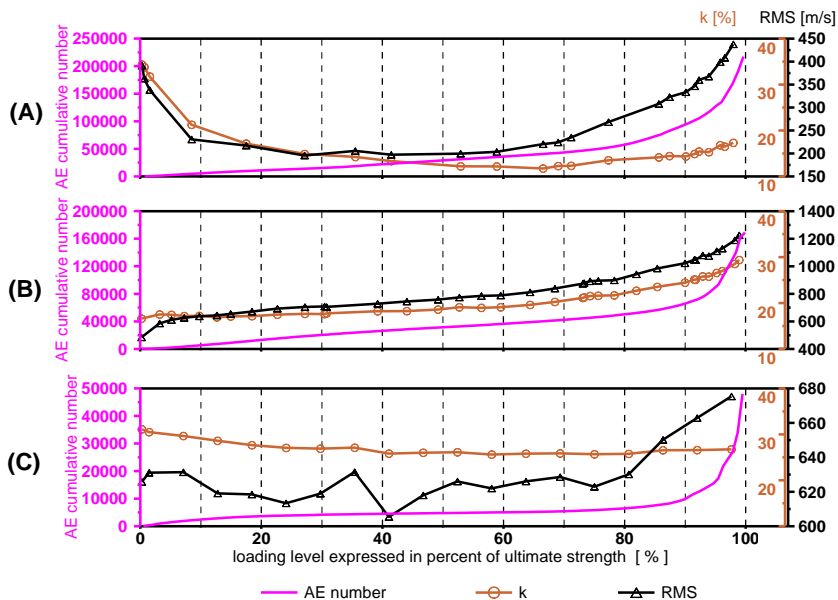
(A) Síla působí kolmo k foliaci; doba zatěžování 7 hod. 49 min., pevnost 111.8 MPa.

(B) Síla působí rovnoběžně s foliací; doba zatěžování 9 hod. 48 min., pevnost 139 MPa.

(C) Síla působí pod úhlem 45° k foliaci; doba zatěžování 8 hod. 51 min., pevnost 125.7 MPa.

Rozdílné režimy jednoosého zatěžování se projevily hlavně při zatížení nad 90% meze pevnosti, kdy při režimu řízené deformace dochází k výraznému nárůstu koeficientu anizotropie, zatím co při řízené síle není pozorována žádná změna. Při zatěžování pomocí řízené deformace jsou koeficienty anizotropie na úrovni zatížení blízké mezi pevnosti výrazně vyšší. Toto chování bylo pozorováno pouze u vzorků s horizontální a vertikální foliací.

U vzorků s působícím namáháním kolmo na foliaci se v průběhu zatěžování nejvýrazněji mění hodnota minimální rychlosti. Hodnoty maximální a střední rychlosti jsou přibližně stejné jako při nulovém zatížení. Minimální rychlost tedy nejvíce ovlivňuje hodnotu koeficientu anizotropie. Tento koeficient klesá až do dosažení zatížení na úrovni 70% meze pevnosti a při dalším zatěžování opět roste (obr. 4 A.). Pokles koeficientu anizotropie je způsoben pravděpodobně uzavíráním systému mikrotrhlin orientovaných souhlasně s foliací. Jeho nárůst po překročení zatížení na úrovni 70% meze pevnosti by mohl souviset s počínajícím vývojem mikrotrhlin ve směru budoucího konečného rozrušení.



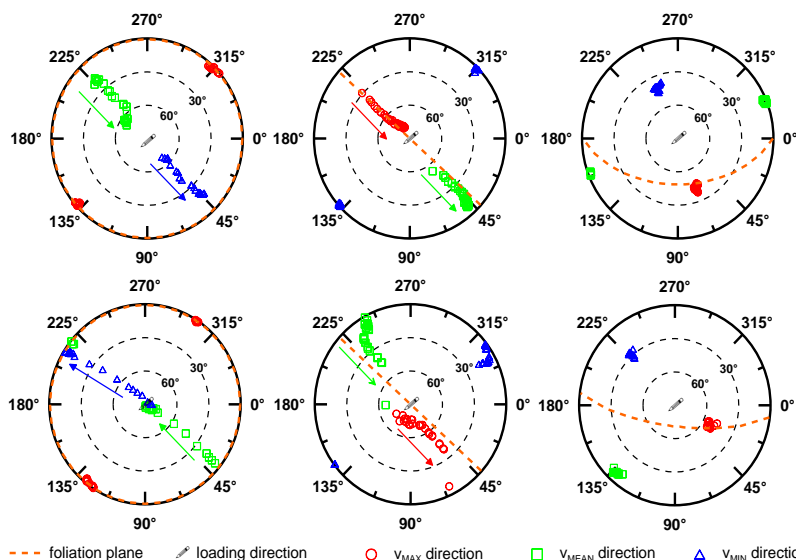
Obr.4 Kumulativní počet jevů ultrazvukové emise (AE number), koeficient anizotropie k (vztah 1) a RMS (vztah 5) vzhledem k úrovni zatížení. Zatěžování řízeno silou s konstantním přírůstkem 0,5 kN/min.

(A) Síla působí kolmo k foliaci; doba zatěžování 7 hod. 49 min., pevnost 111,8 MPa.

(B) Síla působí rovnoběžně s foliací; doba zatěžování 9 hod. 48 min., pevnost 139 MPa.

(C) Síla působí pod úhlem 45° k foliaci; doba zatěžování 8 hod. 51 min., pevnost 125,7 MPa.

Orientace vektorů maximální a minimální rychlosti u nezatížených vzorků je především daná strukturou migmatitu. Maximální rychlost leží v rovině foliace a minimální je k ní kolmá. Vlivem zatížení dochází ke změnám v orientaci těchto směrů. Minimální rychlost se orientuje do směru kolmého k budoucí ploše konečného porušení. Maximální rychlost se orientuje do roviny budoucího konečného porušení (obr. 5).



Obr.5 Změny směrů rychlostí v_{MAX} , v_{MEAN} a v_{MIN} v průběhu zatěžování; nahoře řízeno silou, dole deformací, vlevo kolmo k foliaci, uprostřed rovnoběžně s foliací, vpravo pod úhlem 45°.

U vzorků, kde namáhání působilo rovnoběžně s foliací, bylo zjištěno, že v průběhu zatěžování mírně roste maximální rychlost. Minimální rychlost se až do dosažení zatížení 70% meze pevnosti nemění a při dalším zatěžování klesá (obr. 3B.). Koeficient anizotropie tedy v celém průběhu zatěžování roste, přičemž k rychlejšímu nárůstu dochází po dosažení 70% meze pevnosti (obr. 4B.). Nárůst maximální rychlosti je způsoben rostoucím zatížením. Neměnnost velikosti minimální rychlosti je způsobena tím, že zatížení je paralelní s foliací, a proto nedochází k uzavírání původního systému mikrotrhlin. Klesání hodnoty minimální rychlosti po dosažení 70% meze pevnosti může být způsobeno rozšiřováním původního systému mikrotrhlin orientovaného ve směru foliace.

Směr minimální rychlosti zůstává po celou dobu zatěžování kolmý k rovině foliace, která odpovídá i budoucí ploše konečného porušení. Směr maximální rychlosti leží po celou dobu v rovině foliace, ale v průběhu zatěžování se orientuje do směru působícího jednoosého zatížení (obr. 5).

U vzorků se šikmou orientací foliace vůči působící síle nedochází k žádným výrazným změnám v hodnotách maximální a minimální rychlosti ani ke změně jejich směrů. To může být způsobeno tím, že v průběhu zatěžování nedochází k uzavírání nebo rozšiřování původního systému mikrotrhlin, ani ke vzniku systému nového. Orientace vektoru minimální a maximální rychlosti opět přibližně odpovídá ploše budoucího porušení, která je paralelní s foliací. Toto chování je možné vysvětlit tak, že deformace vzorku je realizována pomocí skluzování po predisponovaných plochách, které jsou orientovány paralelně s foliací. V tomto případě se tedy v průběhu deformace vzorku projeví sebemenší odlišnosti v jeho homogenitě a na základě toho by se dalo porozumět i velmi odlišným typům chování (pevnost, ultrazvuková emise) zkoušených šikmých vzorků.

Závěr

Při malých zatíženích anizotropie rychlosti stanovená na kulovém vzorku ($v_{MAX} = 6$ km/s, $v_{MIN} = 3.5$ km/s, $k = 42\%$) odpovídá anizotropii na válcovém vzorku ($v_{MAX} = 6.6$ km/s, $v_{MIN} = 3.8$ km/s, $k = 42\%$).

Při konstantním přírůstku deformace koeficient anizotropie rapidně vzrůstá (až o 10%) po překročení cca 90% meze pevnosti což souvisí s porušováním vzorku.

Při zatěžování šikmo k foliaci se polohy os rychlostního elipsoidu v průběhu jednoosého zatěžování nemění.

Při zatěžování kolmo na foliaci se orientace osy maximální rychlosti v průběhu jednoosého zatěžování nemění.

Při zatěžování rovnoběžně s foliací se orientace osy maximální rychlosti v průběhu jednoosého zatěžování stáčí do směru působící síly.

Rotace os rychlostního elipsoidu je nezávislá na režimu namáhání.

Osa maximální rychlosti leží vždy v rovině budoucího porušení a osa minimální rychlosti je k této rovině kolmá.

Poděkování

Tato práce vznikla za finanční podpory projektu GAČR číslo 205/06/0906, projektu GAUK č. 47007 a výzkumných záměrů Přírodovědecké fakulty UK č. MSM0021620855 a Geologického ústavu AV ČR v.v.i. č. VZ 3013051. Speciální poděkování patří technikům Laboratoře fyzikálně-mechanických vlastností hornin Z. Erdingerovi, V. Fillerovi a J. Strakové za přípravu vzorků a realizaci experimentálních měření.

Literatura

- [1] Babuška, V. (1984): Anizotropie hluboké stavby litosféry. Disertační práce k získání vědecké hodnosti doktora geologických věd. Universita Karlova, Přírodovědecká fakulta.
- [2] Birch, F. (1961): The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, Part II. J. Geophys. Res. 66, 2199-2224.
- [3] Meju Max, A. (1994): Geophysical Data Analysis: Understanding Inverse Problem Theory and Practice. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa. 296 pp.
- [4] Pros, Z. & Podroužková, Z. (1974): Apparatus for Investigating the Elastic Anisotropy on Spherical Samples at High Pressure, Veröff. Zentralinst. Physic Erde, 22, 42-47.
- [5] Pros, Z. (1977): Investigation of anisotropy of elastic properties of rocks on spherical samples at high hydrostatic pressure. In: High pressure and temperature studies of physical properties of rocks and minerals, Naukova Dumka, Kyjev, 56-57, [in Russian].
- [6] Pros, Z., Lokajíček, T. & Klíma, K. (1998): Laboratory study of elastic anisotropy on rock samples. Pure Appl. Geophys. 151, 619-629.